



Technical economic study of projects for cooking crystallized fruits by using water steam

Abstract

This technical economic study shows the results of three constructive projects, and which one is more economically viable concerning the water steam consumption for heating pans of candied fruits in a food industry. The thermal analysis was emphasized on to determine the ideal constructive form of the necessary equipment for the process. Three forms of water steam use were compared for the heating of the pan: the use of the steam in a direct form, injecting the steam directly inside the pans, the use of the steam in an indirect form, heating the mixture by involving the pan, and the steam use in an indirect form, heating the mixture by inserting a steam circulating coil in the pan. The study was based on an actual operation of an industry which uses steam in an indirect form. The steam was discharged after use. The analysis calculated the energy amount necessary for the fruits cooking cycle. After that, for each form of steam use, it was calculated the necessary steam rate and the cost to get it. The study shows that there is not a significant difference between the last two processes, which use steam in an indirect form, and that the use of direct water steam injection process is much more economic, with a financial reduction of 59,4%.

Key words

Cooking. Economic analysis. Energy. Heat transport. Steam.

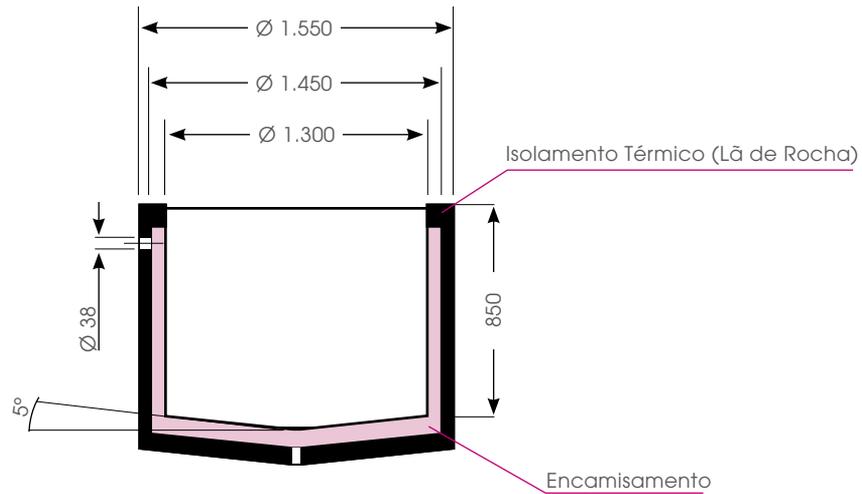


Figura 1 - Características do tacho encamisado.

Fonte: elaboração própria.

1.2. O tacho com camisa (ou encamisado)

Iniciando-se o estudo, vamos executá-lo conforme descrito nas etapas 1, 2 e 3.

1.2.1. Primeira etapa

Verifica-se que, na primeira etapa, a quantidade de energia (Q) necessária para elevar a temperatura da mistura de 25°C para 90°C será de:

$$Q_{m1} = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_{m1} = 286 \text{ MJ}$$

em que Q_f e Q_a representam a quantidade de energia necessária para elevar as temperaturas da fruta e da água, respectivamente. Essa quantidade foi estimada, utilizando-se coeficientes de calor específico para a fruta e para a água.

Determinaremos a seguir as taxas e trocas de calor da camisa de vapor para o interior do tacho. As resistências térmicas (INCROPERA; DE WITT, 2003, p. 61) em torno da camisa de vapor estão ilustradas na Figura 2.

Efetuando-se o mesmo procedimento, verificaremos agora a taxa mínima ($\dot{q}_{MÍN1}$) de transferência de calor que será transmitido à mistura, considerando que esta atingiu a temperatura necessária para o início do processo, ou seja, 90°C:

$$\dot{q}_{MÍN1} = 177,4 \text{ kW}$$

Com o valor da taxa mínima de transferência de calor, podemos estimar quanta energia será necessária para a manutenção (Q_{MAN1}) da mistura por 30 minutos à temperatura de 90°C ideal para o primeiro cozimento (Q_{IC}).

$$Q_{MAN1} = 319,3 \text{ MJ}$$

A partir daí, podemos determinar o valor total de energia necessário para que o primeiro cozimento se efetue:

$$Q_{IC} = Q_{m1} + Q_{MAN1} \Rightarrow Q_{IC} = 605,3 \text{ MJ}$$

Com os valores das taxas máxima e mínima de transferência de calor definidos, temos condições de verificar também a taxa média ($\dot{q}_{MÉD1}$) de transferência calor, ou seja:

$$\dot{q}_{MÉD1} = 254,3 \text{ kW}$$

Define-se, então, a variação de tempo (Δt) para que a mistura eleve sua temperatura de 25°C para 90°C.

$$\Delta t_1 = \frac{Q_{m1}}{\dot{q}_{MÉD1}} \Rightarrow \Delta t_1 = 19,14 \text{ min.}$$

1.2.2. Segunda etapa

Para iniciar-se a segunda etapa do processo, deve-se efetuar um balanço energético, pois a água do primeiro cozimento é despejada e o tacho completado novamente com o mesmo volume. No entanto, a nova

1.2.3. Terceira etapa

Efetuando-se o procedimento da etapa anterior, define-se, pelo balanço energético, a temperatura inicial da mistura na terceira etapa, ou seja, após a troca da segunda água de cozimento.

$$T_{i3} = 43,46^{\circ}\text{C}$$

A quantidade de energia necessária para aquecer a mistura de 43,46°C até 60°C é:

$$Q_{m3} = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_{m3} = 72,8 \text{ MJ}$$

Os valores para taxa de transferência de calor, máxima, mínima e média, são:

$$\dot{q}_{\text{MÁX3}} = 289 \text{ kW}$$

$$\dot{q}_{\text{MÍN3}} = 249 \text{ kW}$$

$$\dot{q}_{\text{MÉD3}} = 268,5 \text{ kW}$$

A quantidade de energia necessária para efetuar o terceiro cozimento é:

$$Q_{\text{MAN3}} = 148,9 \text{ MJ}$$

$$Q_{3\text{C}} = Q_{m3} + Q_{\text{MAN3}} \Rightarrow Q_{3\text{C}} = 221,6 \text{ MJ}$$

O tempo de aquecimento da mistura de 43,46°C até 60°C é:

$$\Delta t_3 = \frac{Q_{m3}}{\dot{q}_{\text{MÉD3}}} \Rightarrow \Delta t_3 = 5,29 \text{ min}$$

1.2.4. Ciclo

A partir dos parâmetros calculados, pode-se representar o processo de cozimento por meio do gráfico da Figura 3:

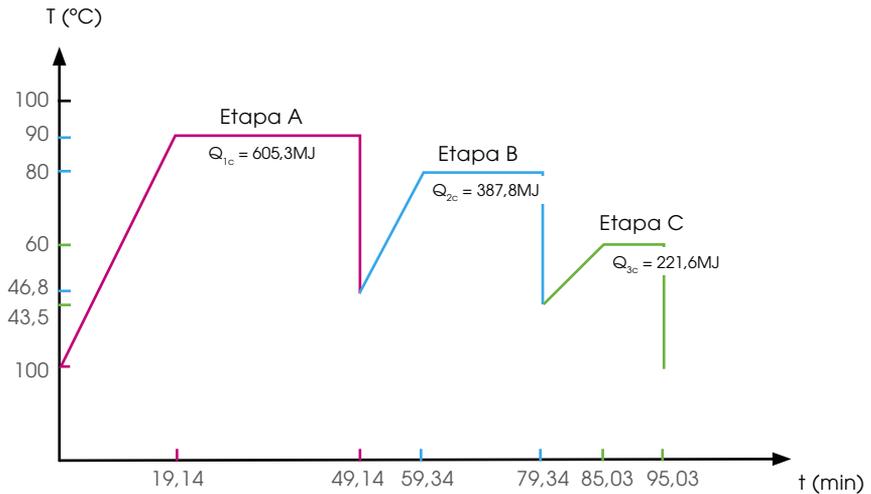


Figura 3 - Gráfico do processo: ciclo total de cozimento.

Fonte: Elaboração própria.

Analisando o gráfico da Figura 3, verifica-se que o tempo total para se efetuar o processo nas três etapas de cozimento será de 95 minutos ou 1 hora e 35 minutos, com um consumo total de energia de 1.214,7 MJ.

A resistência térmica da troca de calor do vapor para o ambiente ($R_{q(amb)}$), observando-se a figura 2, é:

$$R_{q(amb)} = \frac{1}{A \cdot h_{vapor}} + \frac{L_{inox}}{A \cdot k_{inox}} + \frac{L_{isolante}}{A \cdot k_{isolante}} + \frac{L_{inox}}{A \cdot k_{inox}} + \frac{1}{A \cdot h_{ar}}$$

Atribuindo valores típicos para os coeficientes de troca de calor, chega-se a:

$$R_{q(amb)} = 0,2296^{\circ} C/W$$

A taxa de troca de calor do vapor para o ambiente é constante, considerando-se constante a diferença da variação de temperatura (ΔT) do vapor e do ambiente. Essa taxa é:

$$\dot{q}_{amb} = \frac{\Delta T}{R_{q(amb)}} \Rightarrow \dot{q}_{amb} = 609,8 \text{ W}$$

Portanto, em todo o ciclo (t_{ciclo}), teremos uma perda de calor para o ambiente de:

$$Q_{\text{amb}} = \dot{q}_{\text{amb}} \cdot \Delta t_{\text{ciclo}} \Rightarrow Q_{\text{amb}} = 3,48 \text{ MJ}$$

Obs.: $\Delta t_{\text{ciclo}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$

O consumo total (Q_{TOT}) de energia, considerando as perdas para o ambiente, será de:

$$Q_{\text{TOT}} = Q_{\text{amb}} + Q_{\text{ciclo}} \Rightarrow Q_{\text{TOT}} = 1.218,2 \text{ MJ}$$

Obs.: $Q_{\text{ciclo}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

A energia acima será fornecida pelo vapor. A vazão de vapor necessária pode ser calculada, considerando que o vapor d'água entra na camisa como vapor saturado e sai como líquido saturado, sempre à pressão do interno da camisa. Assim, a energia que o vapor fornece ao tacho e ao ambiente é sua entalpia de vaporização (\dot{m}_v).

Dessa forma, a vazão de vapor para esse processo é:

$$\dot{m}_v = 372,30 \text{ kg/h} \Rightarrow \dot{m}_{v(\text{ANO})} = 15.636,8 \text{ t/ano}$$

1.3. Realização do processo com a utilização do tacho com serpentina

No novo arranjo a ser considerado, uma serpentina será imersa no tacho e a mistura (fruta+água) receberá, através dessa serpentina (\dot{q}_s), a energia necessária para passar pelo processo de cozimento. A disposição de enrolamento vertical da serpentina se dará acompanhando as paredes do tacho, formando uma superfície lateral de um cilindro oco. O espaço central desse cilindro permitirá as operações manuais de homogeneização da mistura.

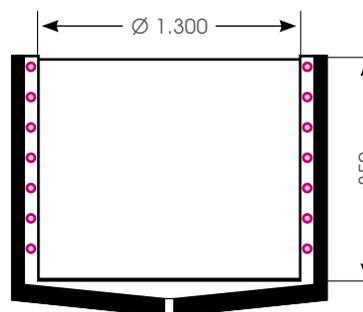


Figura 4 – Configuração do tacho com serpentina.

Fonte: Elaboração própria.

$$\text{Primeira etapa: } \dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 283,1 \text{ W}$$

$$\text{Segunda etapa: } \dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 239,5 \text{ W}$$

$$\text{Terceira etapa: } \dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 152,5 \text{ W}$$

Com esses valores, registra-se uma taxa média de transferência de calor e, com isso, define-se a quantidade de energia que será despendida para o ambiente, durante todo o ciclo:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (ambiente)}} = 248,4 \text{ W}$$

Pode-se determinar a taxa média de transferência de calor para a mistura:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (mistura)}} = 213,1 \text{ kW}$$

Portanto, teremos uma taxa média de transferência de calor para o ciclo de:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (ciclo)}} = \dot{q}_{\text{MÉD (ambiente)}} + \dot{q}_{\text{MÉD (mistura)}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{MÉD (ciclo)}} = 213,3 \text{ kW}$$

A vazão mássica de vapor a ser consumida para se efetuar o ciclo de cozimento será de:

$$\dot{m}_v = 371,7 \text{ kg/h}$$

$$m_{v(\text{ANO})} = 15.611,4 \text{ t/ano}$$

Podemos verificar que há menor perda de energia do tacho para o meio ambiente, pois a diferença de temperatura é menor, por causa da diferença de temperatura da mistura em relação à temperatura ambiente. No caso do tacho encamisado, essa diferença se dá entre a temperatura do vapor e a do ambiente (considerando-se iguais as áreas e a espessura do

leva a efetuar também esse estudo por partes. Num primeiro momento, veremos quanto de calor o ambiente receberá, durante o ciclo de cozimento, desde o aquecimento da mistura.

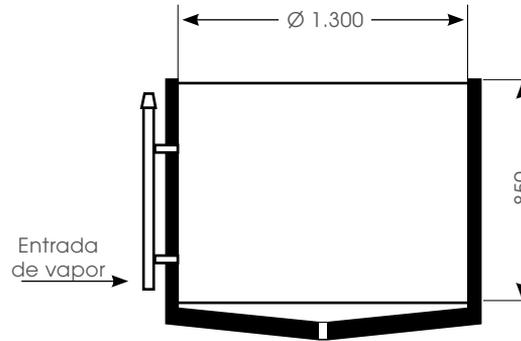


Figura 7 - Configuração do tacho com injeção direta.

Fonte: Elaboração própria.

A energia necessária para aquecer a mistura de 1.016 L é de:

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \Rightarrow Q_f = 96,1 \text{ MJ}$$

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta T \Rightarrow Q_a = 153,6 \text{ MJ}$$

$$Q_m = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_m = 249,7 \text{ MJ}$$

A quantidade de energia dissipada para o ambiente durante a primeira etapa será de:

$$\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 283,1 \text{ W}$$

$$Q_{\text{amb}} = \dot{q}_{\text{amb}} \cdot \Delta t_1 \Rightarrow Q_{\text{amb}} = 834,7 \text{ kJ}$$

Para conseguirmos os valores de vazão em massa de vapor necessário à efetuação do processo – ou seja, massa de vapor de aquecimento (m_{va}) – vamos considerar que a massa de vapor que condensará será igual ao valor de massa de vapor a ser injetado no fundo do tacho. Portanto, a equação que esboça essa condição será:

$$Q_{\text{amb}} = \dot{q}_{\text{amb}} \cdot \Delta t_2$$

$$Q_{\text{amb}} = 434 \text{ kJ}$$

A massa de vapor injetado na mistura para a segunda etapa será:

$$m_{\text{va}2} = \left[\frac{Q_a - Q_f}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{\text{va}2} = 69,25 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vm}2} = \left[\frac{Q_{\text{amb}}}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{\text{vm}2} = 0,231 \text{ kg}$$

$$m_{\text{TOT}2} = m_a + m_{\text{va}2} + m_{\text{vm}2} \Rightarrow m_{\text{TOT}2} = 700 \text{ kg}$$

Para a terceira etapa, segue-se com o mesmo procedimento, porém o volume de água a ser acrescentado nesta etapa será de 664 L:

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \Rightarrow Q_f = 29,5 \text{ MJ}$$

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta T \Rightarrow Q_a = 97 \text{ MJ}$$

$$\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 152,5 \text{ W}$$

$$Q_{\text{amb}} = \dot{q}_{\text{amb}} \cdot \Delta t_3 \Rightarrow Q_{\text{amb}} = 144 \text{ kJ}$$

$$m_{\text{va}3} = \left[\frac{Q_a - Q_f}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{\text{va}3} = 35,98 \text{ kg}$$

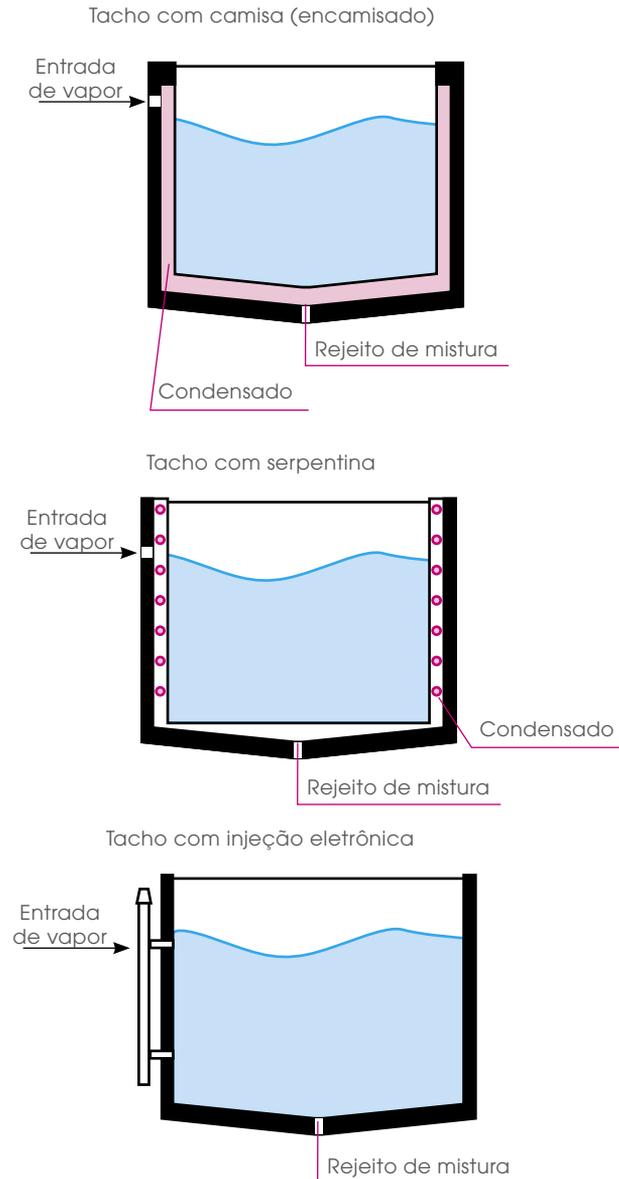


Figura 8 - Rejeitos energéticos.

Fonte: Elaboração própria.

Está subentendido nessas considerações que o vapor d'água injetado tem características que permitem pô-lo em contato com as frutas que se destinam a consumo humano. Essa hipótese pode não ser verdadeira, dependendo da qualidade da água e do tratamento para condicioná-la ao processo da caldeira. Nesse caso, a economia com injeção direta representa aproximadamente o limite que processos de troca de calor realizados com camisa ou serpentina de vapor podem alcançar. Esse limite será alcançado se, nos processos com camisa ou serpentina de vapor d'água, o

2.2. Custo do consumo de gás natural para o tacho com a utilização de serpentina

Adotando-se o método do item anterior, encontraremos, a seguir, o valor do consumo de energia, o consumo de gás (\dot{v}_g) por mês, e o custo anual relativo ao consumo do gás para a aplicação estudada.

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v \cdot (h_v - h_l) \Rightarrow \dot{Q}_v = 3,13 \cdot 10^6 \text{ MJ/mês} \Rightarrow \dot{v}_g = \frac{\dot{Q}_v}{\text{PCI}_g}$$

$$\dot{v}_g = 79,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$C_{\text{ANO}} = 12 \cdot \dot{v}_g \cdot C_g \Rightarrow C_{\text{ANO}} = 705.629,44 \text{ R\$/ano}$$

Tabela 1 – Comparativa de valores

Projeto	Consumo de vapor ^l /ano	Consumo de gás natural ^m ³ /ano	Custo do gás natural ^R \$/ano
Tacho encamisado	15.612	925.575	706.768
Tacho com serpentina	15.364	924.083	705.629
Tacho com injeção direta	6.352	375.973	287.093

Fonte: Elaboração própria.

2.3. Custo do consumo de gás natural para o tacho com a utilização de injeção direta de vapor

Com o consumo de 544.428 ^{kg}/mês de vapor, constataremos que o consumo de energia, gás natural e o custo anual serão de:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v \cdot (h_v - h_l) \Rightarrow \dot{Q}_v = 1.277 \cdot 10^6 \text{ MJ/mês} \Rightarrow \dot{v}_g = \frac{\dot{Q}_v}{\text{PCI}_g}$$

$$\dot{v}_g = 34,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$C_{\text{ANO}} = 12 \cdot \dot{v}_g \cdot C_g \Rightarrow C_{\text{ANO}} = 287.092,66 \text{ R\$/ano}$$

